

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КЛЕЕВОЙ АНКЕРОВКИ АРМАТУРНЫХ СТЕРЖНЕЙ СЕРПОВИДНОГО ПРОФИЛЯ

Шутенко Л.Н., д-р техн. наук, проф., Золотов М.С., канд. техн. наук, проф., Скляр В.А., канд. техн. наук, Корекия О.Н., Шишкин Э.А.
Харьковская национальная академия городского хозяйства
61002, Украина, г. Харьков, ул. Революции, 12
E-mail: zolotov@ksame.kharkov.ua

Исследования кратковременной и длительной прочности клеевой анкерровки арматурных стержней серповидного профиля класса А500С показали на ее достаточную надежность. Применение таких анкерных соединений потребовало изучения их напряженно-деформированного состояния при кратковременном и длительном воздействиях выдерживающих усилий на арматурный стержень (рис. 1).

Результаты исследований, выполненных в Харьковской национальной академии городского хозяйства свидетельствуют, что при длительно действующих нагрузках поведение акриловых клеев согласуется с линейной теорией ползучести.

При рассмотрении напряженного состояния тел вращения под действием осесимметричной нагрузки напряжения и перемещения в условиях линейной ползучести могут выражаться через бигармоническую функцию А.Лява:

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (2 - \nu) \Delta^2 \Phi - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right\}; \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu \Delta^2 \Phi - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} \right\}; \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu \Delta^2 \Phi - \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right\}; \quad (3)$$

$$\tau_{rz} = \frac{\partial}{\partial r} \left\{ (1 - \nu) \Delta^2 \Phi - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right\}; \quad (4)$$

$$u = \frac{1 + \nu}{E(t)} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r \partial z} + \int_{\tau_1}^t (1 + \nu) \frac{\Delta^2 \Phi}{\partial r \partial z} \frac{\partial}{\partial \tau} \omega(t, \tau) d\tau. \quad (5)$$

$$\omega = \frac{1 + \nu}{E(t)} \left\{ 2(1 - \nu) \Delta^2 \Phi - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right\} + \int_{\tau_1}^t (1 + \nu) \left\{ 2(1 - \nu) \frac{\Delta^2 \Phi}{\partial z^2} \right\} \frac{\partial}{\partial \tau} \omega(t, \tau) d\tau; \quad (6)$$

$$\Delta^4 \Phi(t, r, z) = 0; \quad (7)$$

$$\omega(t, \tau) = \frac{1}{E(\tau)} + G(t, \tau), \quad (8)$$

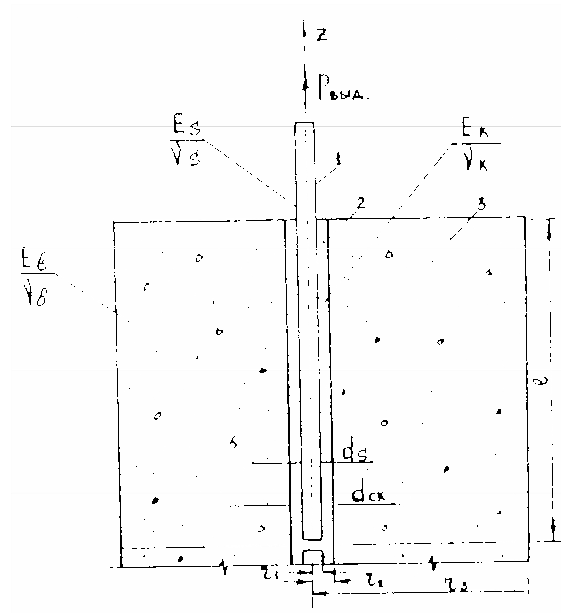


Рис. 1 – Расчетная схема анкерного соединения на акриловом клее:
1 – арматурный стержень; 2 – слой акрилового клея; 3 – бетонный цилиндр

где ν – коэффициент Пуассона; r, z – цилиндрические координаты; τ – возраст акрилового клея; t – момент времени, для которого определяется напряженное состояние; τ_1 – возраст акрилового клея, для которого определяется напряженное состояние; $E(t)$ – мгновенный модуль упругости акрилового клея; G – мера ползучести.

Подставим функцию напряжения в виде

$$\Phi(t, r, z) = \varphi(t) \chi(r, z). \quad (9)$$

В соответствии с результатами исследований ползучести акрилового клея и граничных условий на торцах анкерного соединения получим функцию напряжения (9) в виде:

$$\sum_s D_s(t) \left\{ z \cos \frac{\lambda_s z}{l} - \frac{l}{\lambda_s} [(2\nu - 1) - \lambda_s t g \lambda_s] \right\} K_0 \left(\frac{\lambda_s r}{l} \right). \quad (10)$$

С учетом ранее полученных авторами решений, подставляя выражение (11) в (1-6), получаем уравнения для напряжений и перемещений в слое акрилового клея:

$$\tau_{rz} = - \sum_s D_s(t) \left(\frac{\lambda_s}{l} \right)^2 \left[\cos^2 \lambda_s \sin \frac{\lambda_s z}{l} + \frac{\lambda_s z}{l} \cos \frac{\lambda_s z}{l} \right] K_0 \left(\frac{\lambda_s r}{l} \right); \quad (11)$$

$$\sigma_z = - \sum_s D_s(t) \left(\frac{\lambda_s}{l} \right)^2 \left[\sin^2 \lambda_s \cos \frac{\lambda_s z}{l} + \frac{\lambda_s z}{l} \sin \frac{\lambda_s z}{l} \right] K_0 \left(\frac{\lambda_s r}{l} \right); \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \sigma_r = & \sum_s D_s(t) \left\{ \left(\frac{\lambda_s}{l} \right)^2 \left[\frac{\lambda_s z}{l} \sin \frac{\lambda_s z}{l} - (1 + \cos^2 \lambda_s) \cos \frac{\lambda_s z}{l} \right] K_0 \left(\frac{\lambda_s r}{l} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{r} \frac{\lambda_s}{l} \left[\frac{\lambda_s z}{l} \sin \frac{\lambda_s z}{l} - (1 + \cos^2 \lambda_s - 2\nu) \cos \frac{\lambda_s z}{l} \right] K_0 \left(\frac{\lambda_s r}{l} \right) \right\}; \end{aligned} \quad (13)$$

$$u = \frac{1+\nu}{E(t)} \sum_s D_s(t) \varphi_s(r, z) - \sum_s \varphi_s(r, z) (1+\nu) \int_{\tau_1}^t D_s(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \omega(t, \tau) d\tau; \quad (14)$$

$$\omega = \frac{1+\nu}{E(t)} \sum_s D_s(t) \Psi_s(r, z) - \sum_s \Psi_s(r, z) (1+\nu) \int_{\tau_1}^t D_s(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \omega(t, \tau) d\tau; \quad (15)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial \omega}{\partial z} = \frac{1+\nu}{E(t)} \sum_s D_s(t) \Psi'_s(r, z) - \sum_s \Psi'_s(r, z) (1+\nu) \int_{\tau_1}^t D_s(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \omega(t, \tau) d\tau, \quad (16)$$

где z – координата точки, в которой определяется напряжение или перемещение; $K_i\left(\frac{\lambda_s r}{l}\right)$ – функция Макдональда.

Рассмотрим граничные условия на поверхности контактов анкера с акриловым клеем и клея с бетоном при его выдергивании, из которых вытекают соотношения, предназначенные для определения функции $D_s(t)$. К граничным условиям относится непрерывность касательных и радиальных напряжений, относительных осевых удлинений и радиальных перемещений на контакте клей-анкер и клей-бетон, а также равенство $\sigma_z = 0$ при $z = 0$.

Начиная с некоторого возраста $\tau_1 > \tau$ ($\tau = 10 \dots 25$ сут.), приращение модуля упругости клея прекращается, поэтому можно пользоваться асимптотическим равенством

$$n(t) = \frac{E_s}{E_t} \approx \frac{E_s}{E_{(\infty)}} = \frac{E_s}{E_K} = n_K. \quad (17)$$

Принимаем для меры ползучести клея следующие выражения:

$$G(t, \tau) = \varphi(\tau) [1 - e^{-\gamma(t-\tau)}]. \quad (18)$$

Хорошо согласуется с данными экспериментов для акрилового клея возраста более 25 сут. аналитическая зависимость меры ползучести:

$$G(t - \tau) = \sum_{k=1}^m A_k l^{-\gamma_k(t-\tau)}. \quad (19)$$

С учетом граничных условий, приведенных ранее, выражений (18,19), а также начала отсчета времени загрузки $t = 0$ определяем функцию напряжения $D_s(t)$. Подставляем полученные значения $D_s(t)$ в формулы (11-13) и получаем значения напряжений $\tau_{rz}^{(k)}, \sigma_z^{(k)}, \sigma_r^{(k)}$ отражающие математическую модель напряженно-деформированного состояния соединения при выдергивании стержня, заделанного в бетон с помощью акрилового клея.

На рис. 2 изображены графики распределения касательных, нормальных осевых и радиальных напряжений в слое акрилового клея на контактах клей-анкер и клей-бетон. Сплошными линиями нанесены кривые распределения напряжений, вычисленные для случая упруго-мгновенного приложения выдергивающего усилия, а пунктиром – кривые распределения напряжений в результате ползучести акрилового клея в течение 100 сут.

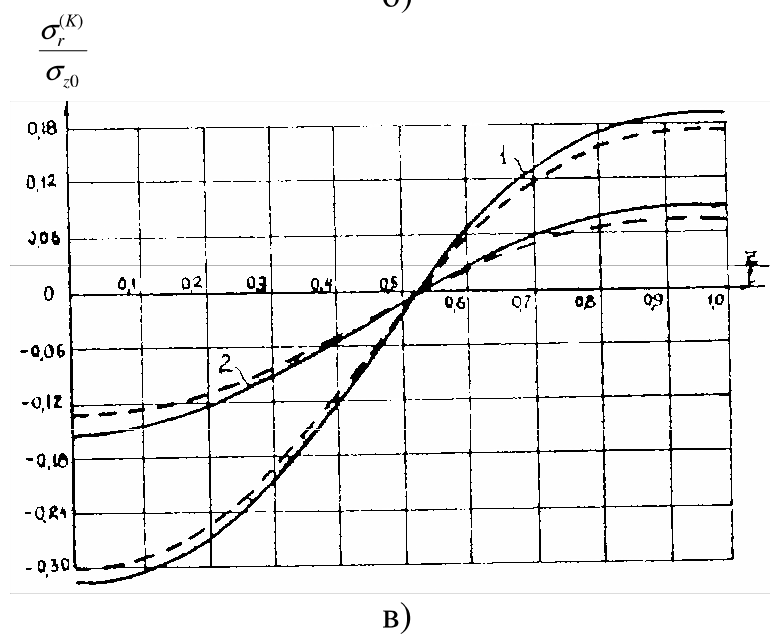
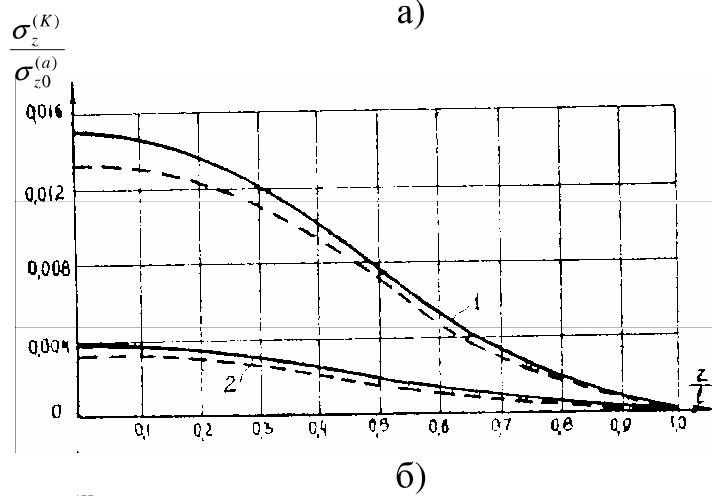
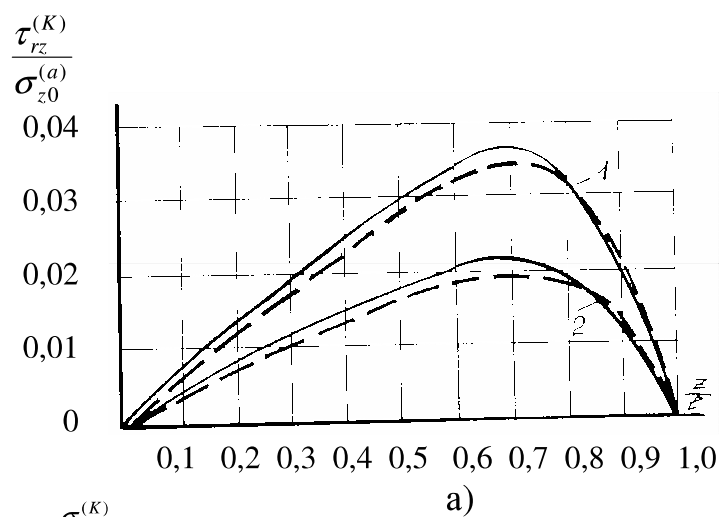


Рис. 2 – Распределение касательных (а), нормальных осевых (б) и радиальных (в) напряжений в клеевом слое на контакте клей-анкер (1) и клей-бетон (2)

Расчет выполнен для анкерного соединения, материалы которого имеют следующие характеристики: модули упругости анкера $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа, клея $E_k = 8,78 \cdot 10^3$ МПа, бетона $E_b = 2,3 \cdot 10^4$ МПа, коэффициенты Пуассона $\mu_s = 0,25$, $\nu_k = 0,35$ и $\nu_b = 0,16$. Геометрические характеристики анкерного соединения: глубина заделки $l = 17,5d_s$, диаметр анкера $d_s = 2,0$ см; диаметр скважины $d_{ck} = 4,0$ см; $l_0 = 20$; $l_1 = 10$.

АДГЕЗИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ ПОЛИМЕРСИЛИКАТНЫХ БЕТОНОВ

Супрун О.Ю., Шелковин А.А., Волювач С.В., *канд. техн. наук*

Харьковская национальная академия городского хозяйства

61002, Украина, г. Харьков, ул. Революции, 12

E-mail: zolotov@ksame.kharkov.ua

Были проведены экспериментальные исследования сцепления полимерсиликатного бетона на жидком стекле с добавкой акрилового полимера [1] и фурфуролового спирта [2], с цементным бетоном при их совместной работе в комплексной конструкции. В опытах использовали стандартные образцы – “восьмерки” (ГОСТ 10180), а также призмы сечением 70х70 мм. При испытании “восьмерок” сначала изготавливали “полувосьмерки” из цементного бетона класса В25 с применением щебня фракции 5...10 мм. После 60 суток твердения в нормальных температурно-влажностных условиях к ним прибетонировали “полувосьмерки” из полимерсиликатного бетона. Комплексные образцы выдерживали в воздушно-сухих условиях 15-18 суток, после чего испытывали на осевое растяжение. Для контроля одновременно испытывали “восьмерки” из цементного бетона класса В25. Призмы также изготавливали из двух половинок в металлической опалубке, в которую сначала устанавливали деревянные вкладыши. С торцов образцов, испытываемых на растяжение, в процессе формования закладывали анкеры диаметром 12 мм на глубину 50...60 мм. Испытание комплексных образцов при кратковременном нагружении проводили на растяжение при изгибе, осевое растяжение и на срез при сжатии. Испытания проводили на разрывной машине “Шоппер”.

Результаты испытаний показали следующее. Прочность на осевое растяжение цельнобетонных (из цементного бетона) образцов составила 2,94 МПа, что в 1,8 раза (минимальное значение – 1,62 раза) превышает величину нормативного сопротивления бетона класса В25 по СНиП 2.03.01-84 (фактическая средняя из трех образцов прочность бетона при сжатии равнялась 30,6 МПа). Прочность на осевое растяжение составных “восьмерок” колебалась в пределах 4,27...4,69 МПа. Причем разрыв соединения происходил во всех случаях по сечению цементного бетона в приконтактной зоне, т.е. наблюдалось упрочнение цементного бетона в области сцепления с полимерсиликатным бетоном. Микроскопическими исследованиями установлено,